



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 103 04 225 A1 2004.08.26

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 103 04 225.3

(22) Anmeldetag: 30.01.2003

(43) Offenlegungstag: 26.08.2004

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: G01R 33/035  
G01R 33/26

(71) Anmelder:  
Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V.,  
07745 Jena, DE

(74) Vertreter:  
Patentanwälte Bock & Bieber GbR, 07745 Jena

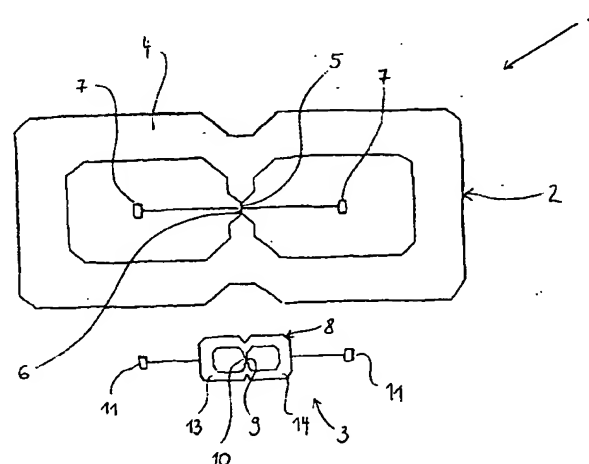
(72) Erfinder:  
Schultze, Volkmar, Dr., 07751 Sulza, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Um eine Messung eines Magnetfeldgradienten zu ermöglichen, die unempfindlich gegenüber homogenen Magnetfeldern ist, wird ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten vorgeschlagen, bei dem für die Messung des Magnetfeldgradienten das homogene Hintergrundmagnetfeld durch ein Magnetometer (3) mit Rückkoppelschleife (17) konstant gehalten wird. Zugleich wird eine entsprechende Messvorrichtung (1) vorgeschlagen, die ein Gradiometer (2) zur Messung des Magnetfeldgradienten und ein Magnetometer (3) mit Rückkoppelschleife (17) zur Erzeugung eines konstanten homogenen Hintergrundmagnetfeldes am Ort des Gradiometers (2) umfasst.



**Beschreibung**

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

**Stand der Technik**

[0002] Zur Messung von Magnetfeldern werden in den letzten Jahren aufgrund ihrer hohen Magnetfeldsensitivität immer häufiger SQUIDs (Supraleitende Quanten-Interferenz-Detektoren oder Superconducting Quantum Interference Devices) eingesetzt. SQUIDs stellen die derzeit empfindlichsten Magnetfeldsensoren dar und werden beispielsweise bei der Messung biomagnetischer Felder des Herzens (Magnetokardiogramme, MKG) und des Gehirns (Magnetenzephalogramme, MEG) eingesetzt. Diese Messungen werden in aufwendigen und teuren Schirmkabinen durchgeführt, die große äußere Umgebungsfelder vom SQUID fernhalten. Dies können natürliche Felder, wie beispielsweise das Erdfeld, aber auch künstliche, beispielsweise von elektrischen Maschinen oder vorbeifahrenden Autos etc. erzeugte Felder sein. Aufgrund der erforderlichen Schirmung und der damit verbundenen Kosten konnte sich diese SQUID-gestützte Technologie in normalen Arztpraxen bisher jedoch nicht etablieren.

[0003] Darüber hinaus besteht ein großes Interesse, SQUIDs auch in solchen Anwendungsgebieten einzusetzen, wo externe Felder vom SQUID nicht ferngehalten werden können. Dies betrifft neben den Fällen, bei denen eine Schirmung technisch unmöglich ist auch die Fälle, bei denen das Vorhandensein des Erdfeldes für die Messung erforderlich wird. Unpraktikabel ist eine Schirmung beispielsweise auf dem großen Einsatzfeld der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (ZfP), wobei der Prüfling häufig ein Teil eines größeren Objektes, beispielsweise einer Brücke oder einer Kraftwerksanlage ist. Völlig ausgeschlossen ist eine Schirmung des Erdfeldes bei geomagnetischer oder archäologischer Prospektion. Hierbei werden entweder künstlich induzierte Felder oder kleine lokale Veränderungen des Erdmagnetfeldes gemessen, wodurch Aufschluss über die Zusammensetzung der Erde gewonnen werden soll.

[0004] Bei vielen der oben genannten Einsatzgebiete werden SQUIDs nicht als Magnetometer verwendet, die das gesamte magnetische Feld am Ort des SQUID-Sensors messen. Vielmehr erfolgt eine Verwendung der SQUIDs als Gradiometer. Gradiometer messen den Feldgradienten, also den Unterschied des Magnetfeldes an zwei Orten. Letzteres bietet den Vorteil, dass der zu messende Feldunterschied, der im Bereich von einigen Femto-Tesla ( $1\text{fT} = 10^{-15}\text{ T}$ ) liegen kann, nicht mehr vor einem Hintergrund des Erdfeldes in der Größenordnung von einigen Mikro-Tesla (typischerweise etwa  $50\text{ }\mu\text{T} = 50 \cdot 10^{-6}\text{ T}$ ) gemessen werden muss. Dies hat eine beträchtliche Reduzierung der Anforderungen an Dynamikumfang

und Schnelligkeit der Informationsverarbeitung zur Folge, wodurch derart empfindliche Messungen vor einem stark gestörten Hintergrund überhaupt erst ermöglicht werden. In der Praxis besitzen SQUID-Gradiometer jedoch immer noch eine Restempfindlichkeit gegenüber homogenen Magnetfeldern. Als Maß für die Güte eines Gradiometers hinsichtlich dieser Magnetfeldunterdrückung dient die sogenannte Balance, ausgedrückt als Quotient von Empfindlichkeit gegenüber Gradientenfeldern und homogenen Feldern. In der Vergangenheit wurden große Anstrengungen unternommen, um hohe Balancen für SQUID-Gradiometer zu erreichen, insbesondere unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bedingungen der Herstellungstechnologie der Gradiometer. Die Anforderungen an ein SQUID-Gradiometer werden noch erhöht, wenn es während der Messung im Erdfeld bewegt werden soll. Dies kann bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, aber auch in der archäologischen oder geomagnetischen Prospektion der Fall sein. Um die Einsatzbereitschaft und die große Sensitivität von SQUID-Gradiometern gegenüber den gesuchten Magnetfeldgradienten auch unter diesen Bedingungen zu gewährleisten, wurde in der Vergangenheit ebenfalls eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt.

[0005] Eine hohe Balance und die Einsatzfähigkeit während der Bewegung im Erdfeld sind insbesondere für SQUIDs aus Hochtemperatur-Supraleiter-Material (HTS, Einsatztemperatur um  $77\text{ K}$ ) relevant. Die gleiche Problematik ist jedoch auch für SQUIDs aus Tieftemperatur-Supraleiter-Material (TTS, Einsatztemperatur um  $4\text{ K}$ ) oder andere Magnetfeldsensoren interessant.

[0006] Aus dem Stand der Technik ist eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die auf Gradiometern mit SQUID-Sensoren beruhen und einzelne Aspekte der oben erwähnten Problematik behandeln. Sie werden den beiden oben formulierten Ansprüchen, hoch balanciert zu sein und Bewegungen im Erdfeld standzuhalten, jedoch nur in unterschiedlichem Maße gerecht. Die verschiedenen Grundtypen von SQUID-Gradiometer, die im folgenden skizziert und bewertet werden sollen, unterscheiden sich in der Art der Ankopplung der Gradiometer-Antenne an den Auslese-SQUID. Eine solche Ankopplung ist immer nötig, da der SQUID selbst aus physikalischen Gründen stets relativ klein gehalten sein muss. Gleichzeitig benötigt der SQUID jedoch eine geometrisch deutlich größere Fläche (Antenne) für eine genügend große Empfindlichkeit des Gesamtsensors gegenüber Magnetfeldern oder Magnetfeldgradienten.

[0007] Die technologisch einfachste und damit insbesondere für HTS-SQUID-Gradiometer interessante Variante ist die direkte Kopplung der Gradiometer-Antenne an den Auslese-SQUID, die auch als galvanische Kopplung bezeichnet wird. Diese Variante ist deswegen so interessant, weil sie mit einer einzigen supraleitenden Schicht auskommt. Ein solches direkt gekoppeltes Gradiometer wird beispielsweise

beschrieben in Zakosarenko V., Schmidl, F., Schneidewind, H., Dörrer, L., and Seidel, P., "Thin Film dc SQUID gradiometer using a single  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  layer," *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 779–780. Ein weiteres Gradiometer ist beschrieben in Daalmans G.M., Bär, L., Kühnl, M., Uhl, D., Selent, M., and Ramos, J., "Single Layer  $\text{YBaCuO}$ -Gradiometer," *IEEE Trans. Appl. Supercond* 5 (1995) 3109–3112. Darüber hinaus ist ein solches Gradiometer auch in V. Schultze, R. P. J. IJsselsteijn, R. Stolz, and V. Zakosarenko, "High T-c SQUIDs for unshielded measuring in disturbed environments," *Journal de Physique IV* vol. 6, 367–372, 1996 dargestellt. Das Grundprinzip der darin beschriebenen direkt gekoppelten Parallelgradiometer beruht darauf, dass Magnetfelder unterschiedlicher Größe im parallel geschalteten Aufnehmerschleifen der Magnetfeldantenne einen entsprechend unterschiedlichen Abschirmstrom hervorrufen. Im Mittelsteg fließt dann die Differenz dieses Stromes, die damit dem Magnetfeldgradienten proportional ist. Dieser Differenzstrom erzeugt einen magnetischen Fluss, der vom SQUID, der als Magnetfluss-Spannungs-Wandler arbeitet, in eine Spannung umgewandelt wird, die als das eigentliche Messsignal dient. Aufgrund der Cosinus-förmigen Abhängigkeit der SQUID-Spannung vom magnetischen Fluss weist der SQUID eine nichtlineare Kennlinie auf. Daher wird eine Linearisierungsschaltung verwendet, die als Rückkoppelschleife arbeitet. Beim SQUID wird sie als Flusskoppelschleife (FLL – Flux Locked Loop) bezeichnet. Für ihre Realisierung wird die SQUID-Spannung über einen Widerstand und eine Spule angelegt. Der Widerstand wandelt die Spannung in Strom, die Spule den Strom in magnetischen Fluss. Dieser Fluss wird in den SQUID-Sensor so eingekoppelt, dass er den durch das äußere, zu messende Magnetfeld erzeugten Fluss kompensiert. Der SQUID-Sensor arbeitet so als Nulldetektor, seine Kennlinie ist linearisiert.

[0008] Aus dieser Notwendigkeit der Flussrückkopplung resultiert der erste Nachteil des direkt gekoppelten Gradiometers. Die Flusskoppelschleife muss den zu messenden Fluss, also beim Gradiometer den durch den Magnetfeldgradienten erzeugten Fluss, rückkoppeln. Mit anderen Worten muss die Rückkoppelschleife den äußeren Magnetfeldgradienten kompensieren. Dies kann beispielsweise durch eine Rückkoppelschleife in Form einer liegenden Acht unter der Gradientenantenne oder einer einfachen Spule unter einer der beiden Aufnehmerschleifen der Antenne erfolgen. Mit einer derartigen Anordnung ist es aber nicht möglich, außen umfließende Abschirmströme zu kompensieren, die durch äußere homogene Magnetfelder erzeugt werden. Insbesondere bei Bewegung im (homogenen) Erdfeld können außen umlaufende Abschirmströme entstehen, welche die Funktion des Gradiometers beeinträchtigen oder sogar völlig zerstören können.

[0009] Der zweite gravierende Nachteil des direkt gekoppelten Gradiometers ist seine schlechte Balan-

ce. Sowohl die Größe des Signals, das aus der Messung des differentiellen Abschirmstroms und damit dem zu messenden Magnetfeldgradienten resultiert, als auch die Empfindlichkeit des Auslese-SQUIDs selbst gegenüber homogenen Magnetfeldern sind fest mit der geometrischen Größe des SQUIDs verknüpft. Daraus resultiert eine ziemlich feste Limitierung der erreichbaren Balance auf Werte um 100. Diese schlechte Balance des direkt gekoppelten Gradiometers kann durch eine Modifikation der Auslese-SQUIDs behoben werden, wie sie beispielsweise in A. Eulenburg, E. J. Romans, C. Carr, A. J. Millar, G. B. Donaldson, and C. M. Pegrum, "Highly balanced long-baseline single-layer high-T-c superconducting quantum interference device gradiometer," *Appl. Phys. Lett.* 75, pp. 2301–2303, 1999 beschrieben wird. Danach werden in der schmalen Verbindungsleitung im Zentrum der Gradiometerantenne zwei gegensinnig orientierte identische Auslese-SQUIDs integriert. Durch ihre gegensinnige Anordnung messen diese SQUIDs zwar homogene Magnetfelder in gleicher Weise wie oben beschrieben. Der in der Gradiometerantenne erzeugte Abschirmstrom erzeugt jedoch einen gegensinnig orientierten Fluss in den SQUIDs. Bei einer Subtraktion der in separaten Flusskoppelschleifen erzeugten SQUID-Signale hebt sich das den homogenen Magnetfeldern entsprechende Signal auf. Das den Gradienten entsprechende Signal addiert sich. Auf diese Weise wird die Balance deutlich erhöht. Das Problem der außen um die Magnetfeldantenne umlaufenden Abschirmströme, verursacht durch homogene Magnetfelder, wird durch diese Konfiguration jedoch auch nicht gelöst.

[0010] Die einfachste Möglichkeit, ein SQUID-Gradiometer herzustellen, verzichtet auf eine zusätzlich angekoppelte Magnetfeldantenne und nutzt hierfür lediglich die Fläche des SQUIDs selbst. Abgesehen davon, dass diese Variante keine große Magnetfeldempfindlichkeit ermöglicht, bleiben die gleichen Probleme mit umlaufenden Abschirmströmen wie bei Gradiometern mit direkt gekoppelter Antenne bestehen, solange man die Beschränkung auf eine einzelne supraleitende Lage nicht aufhebt. Bei Verwendung mehrerer supraleitender Lagen eröffnen sich mehr Möglichkeiten, die Probleme der Balance und der umlaufenden Abschirmströme zu lösen. Die Magnetfeldantenne kann beispielsweise in Form eines Seriengradiometers ausgelegt werden, wie dies in V. Schultze, R. IJsselsteijn, A. Chwala, N. Oukhanski, V. Zakosarenko, and H. G. Meyer, "HTS SQUID gradiometer for application without shielding," *Supercond. Sci. Technol.* 15, 120–125, 2002 beschrieben ist. Dabei lausen die Verbindungsleitungen der beiden Aufnehmerschleifen des Gradiometers über Kreuz, wodurch umlaufende Abschirmströme, hervorgerufen durch homogene Magnetfelder, a priori vermieden werden. Die Kreuzung benötigt eine zweite supraleitende Lage, wodurch sich wiederum die Möglichkeit ergibt, die Kopplung der Magnetfeldantenne an den SQUID sehr effektiv zu gestalten. Sie erfolgt über

eine Einkoppelspule, die in die Gradiometerantenne integriert ist und gegenüber dem Auslese-SQUID positioniert wird. Der Preis für die effektive Einkopplung über die integrierte Spule ist die relativ große Fläche des Auslese-SQUIDS, welche aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber homogenen Magnetfeldern wieder eine schlechte Balance hervorruft.

[0011] Bei dem in V. Schultze, R. IJsselsteijn, A. Chwala, N. Oukhanski, V. Zakosarenko, and H. G. Meyer, "HTS SQUID gradiometer for application without shielding," Supercond. Sci. Technol. 15, 120–125, 2002 beschriebenen Gradiometer ist deshalb ein weiterer SQUID vorhanden. Er ist in einer der beiden Aufnehmerschleifen des Gradiometers so angeordnet, dass er dort das homogene Magnetfeld über eine separate Flusskoppelschleife misst. Dessen Signal wird gewichtet vom Gradiometersignal elektronisch subtrahiert. Dadurch wird das vom homogenen Magnetfeld hervorgerufene Signal aus dem Gradiometersignal weitgehend eliminiert und eine gute Balance erreicht.

[0012] Mit Hochtemperatur-Supraleiter-Material ist eine vollständig integrierte Form des in dieser Schrift offenbarten Gradiometers technologisch nur sehr schwer ausführbar. Deshalb wird sie vorzugsweise in einer Flip-Chip-Konfiguration ausgeführt. Dies bedeutet, dass die SQUIDS einerseits und die Gradiometerantenne mit der Einkoppelspule andererseits auf zwei verschiedenen Substraten hergestellt sind, die Gesicht an Gesicht gegeneinander gepresst werden. Aus dieser Flip-Chip-Bauweise ergibt sich wiederum das Problem, dass es praktisch nicht möglich ist, den Flip-Chip-Aufbau mit exakt parallelen Substraten zu realisieren. Daraus resultieren Fehlsignale, wenn ein homogenes Magnetfeld von der Seite angreift, so dass die Balance wieder verschlechtert wird.

[0013] Ein vollständig integrierter Aufbau, der zur Lösung einer Vielzahl der beschriebenen Probleme dienen kann, ist in R. Stolz, L. Fritsch, and H. G. Meyer "LTS SQUID sensor with a new configuration", Supercond. Sci. Technol. 12, 806–808, 1999 beschrieben. Die dort skizzierte Lösung ist jedoch auf die Tieftemperatur-Supraleiter-Technologie beschränkt. Eine Übertragung auf Hochtemperatur-Supraleiter-Technologie erscheint aus derzeitiger Sicht auf längere Zeit nicht realisierbar.

#### Aufgabenstellung

[0014] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Messung eines Magnetfeldgradienten zu ermöglichen, die unempfindlich gegenüber homogenen Magnetfeldern ist. Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren nach Patentanspruch 1 sowie durch eine Vorrichtung nach Patentanspruch 6 gelöst.

[0015] Erfindungsgemäß wird ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten vorgeschlagen, bei dem für die Messung des Magnetfeldgradienten das homogene Hintergrundmagnetfeld durch

ein Magnetometer mit Rückkoppelschleife konstant gehalten wird. Zugleich wird eine entsprechende Messvorrichtung vorgeschlagen, die ein Gradiometer zur Messung des Magnetfeldgradienten und ein Magnetometer mit Rückkoppelschleife zur Erzeugung eines konstanten homogenen Hintergrundmagnetfeldes am Ort des Gradiometers umfasst. Um eine möglichst große Magnetfeldgradientenempfindlichkeit zu erreichen werden als Magnetfeldsensoren bzw. Magnetfeldgradientensensoren vorzugsweise SQUIDS verwendet, da sie die beste derzeit mögliche Sensitivität gegenüber Magnetfeldern und deren Gradienten besitzen. Selbstverständlich kann die erfindungsgemäße Lösung jedoch auch mit anderen Magnetfeldsensoren realisiert werden. Der gleichzeitige Betrieb beider Sensoren für Gradiometer und Magnetometer erfordert getrennte Rückkopplungen, also Magnetfeldkompensationen. Dies wird bei der vorliegenden Erfindung derart gelöst, dass sich die Rückkopplungen nicht gegenseitig beeinflussen. Ein Übersprechen zwischen dem Gradiometer und dem Magnetometer, etwa durch die gegenseitige Modulation der Rückkoppelfelder, wird vermieden.

[0016] Mit der Erfindung wird es insbesondere möglich, die bisherigen Nachteile der direkt gekoppelten Gradiometer zu vermeiden. Es werden empfindliche Magnetfeldgradientenmessungen auch in Anwesenheit eines großen homogenen Hintergrundmagnetfeldes oder selbst bei Bewegung in diesem Feld möglich. Die Erfindung ermöglicht eine wesentlich verbesserte Messqualität bei allen Einsatzfällen, in denen externe Felder vom Magnetfeldgradientensensor nicht ferngehalten werden können, wie der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder der geomagnetischen oder archäologischen Prospektion. Insbesondere während Messungen im Erdfeld mit einem sich bewegendem Gradiometer kann mit Hilfe der Erfindung die Einsatzbereitschaft und die große Sensitivität des Gradiometers gegenüber den gesuchten Magnetfeldgradienten erhalten werden. Durch die Erfindung werden zum einen unzulässig große Abschirmströme vermieden. Zum anderen wird eine hohe Balance gewährleistet. So konnten Balance-Werte von 3800 erzielt werden. Dies stellt eine drastische Verbesserung gegenüber dem Balance-Wert von bestenfalls etwa 100 dar, den man für derartige direkt gekoppelte Gradiometer bisher erreichen konnte. Wie Versuche gezeigt haben, bleibt die hohe Balance auch bei Bewegungen im Erdfeld bestehen. Von besonderem Vorteil ist auch die konstruktiv vorteilhafte und einfache Ausgestaltung der Messvorrichtung, die gegenüber herkömmlichen Systemen eine geringe Fehleranfälligkeit aufweist. Die Erfindung kann sowohl mit direkt gekoppelten Gradiometern als auch mit induktiv gekoppelten Gradiometern durchgeführt werden.

[0017] Zum Fernhalten großer äußerer Umgebungsfelder vom Magnetfeldgradientensensor sind keine aufwendigen und teuren Schirmungen mehr erforderlich. Der Einsatz von SQUIDS, beispielsweise

bei biomagnetischen Anwendungen in Arztpraxen, wird daher auch mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich.

[0018] Die erfindungsgemäße Lösung ist besonders vorteilhaft für eine Verwendung mit Hochtemperatur-Supraleiter-Technologie geeignet, ohne jedoch hierauf beschränkt zu sein. Sie kann gleichermaßen auch mit Tieftemperatur-Supraleiter-Technologie realisiert werden.

[0019] Besonders vorteilhaft ist die Verwendung der Erfindung für einlagige SQUID-Sensoren, realisiert mit HTS-Technologie, da es hierzu bisher keine zufriedenstellende Lösung für die Realisierung von Gradiometern gibt, die im Erdfeld (stationär oder in Bewegung) einsetzbar sind. Aufgrund des einfachen Aufbaus können derartige Meßsysteme auf einem einzigen Chip realisiert werden.

[0020] Weitere Vorteile, Besonderheiten und zweckmäßige Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen oder deren Unterkombinationen.

#### Ausführungsbeispiel

[0021] Die Erfindung wird nachstehend an Hand der Zeichnungen und der Ausführungsbeispiele näher erläutert. Es zeigen:

[0022] **Fig. 1:** eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung in Draufsicht,

[0023] **Fig. 2:** eine schematische Darstellung des Auslese-SQUIDs des in **Fig. 1** gezeigten Gradiometers,

[0024] **Fig. 3:** eine schematische Darstellung des Auslese-SQUIDs des in **Fig. 1** gezeigten Magnetometers,

[0025] **Fig. 4:** eine schematische Darstellung der in **Fig. 1** gezeigten Vorrichtung mit Rückkoppelschleifen in Draufsicht, **Fig. 5:** eine schematische Darstellung der in **Fig. 1** gezeigten Vorrichtung mit Rückkoppelschleifen in einer Seitenansicht.

[0026] Die in **Fig. 1** gezeigte Messvorrichtung 1 umfasst ein direkt gekoppeltes Gradiometer 2 sowie ein hierzu benachbart angeordnetes direkt gekoppeltes Magnetometer 3. Bei dem Parallelgradiometer 2 entsprechend dem nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiel kreuzt die zur Realisierung der Josephson-Kontakte 18 notwendige Korngrenze die Magnetfeldantenne 4. Bereits bei kleinster Bewegung im Erdfeld würde der daraus resultierende Abschirmstrom im äußeren Ring der Antenne dazu führen, dass der kritische Strom dieser Kreuzung überschritten und die Antenne nicht mehr funktionieren würde. Das benachbart angeordnete Magnetometer 3 hält durch seine Rückkoppelschleife die Normalkomponente des homogenen Magnetfeldes am Ort der beiden Sensoren hingegen konstant.

[0027] Das Gradiometer 2 weist eine breite Gradiometerantenne 4 auf, in deren Zentrum sich eine schmale Verbindungsleitung 5 befindet, in welche als Sensor ein Gradiometer-Auslese-SQUID 6 integriert

ist. Die beiden Anschlüsse 7 des Auslese-SQUIDs 6 sind als Kästchen in den Aufnehmerschleifen der Gradiometerantenne 4 symbolisiert. Das Gradiometer 2 umfasst zusätzlich die für seinen Betrieb notwendige Elektronik (nicht dargestellt).

[0028] Das Magnetometer 3 weist zwei breite Magnetometerantennen 8 auf. Im Zentrum befinden sich schmale Verbindungsleitungen 9. In diese Verbindungsleitungen 9 ist als Sensor ein Magnetometer-Auslese-SQUID 10 integriert. Die am Magnetometer 3 außen angebrachten Anschlüsse 11 des Magnetometer-SQUIDs 10 sind wiederum durch Kästchen schematisch dargestellt. Zur Vereinfachung der Darstellung ist auch hier die erforderliche Elektronik nicht abgebildet.

[0029] Sowohl Auslese-SQUID 6 des Gradiometers 2 als auch der Auslese-SQUID 10 des Magnetometers 3 sind einlagig realisiert. Die **Fig. 2** und **3** zeigen vergrößert die Auslese-SQUIDs 6, 10 von Gradiometer 2 und Magnetometer 3.

[0030] Erfindungsgemäß sind Gradiometer 2 und Magnetometer 3 sehr nahe zueinander angeordnet, beispielsweise auf einem gemeinsamen Substrat (nicht dargestellt), so dass sie einen integrierten Mess-Chip bilden. Die Magnetfeldgradienten-Messvorrichtung 1 umfasst somit zwei Sensoren 6, 10 (Kanäle), die sich an nahezu dem gleichen Ort befinden. [0031] Eine gegenseitige Beeinflussung beider Kanäle wird erfindungsgemäß durch die Rückkopplung des Magnetometers 3 verhindert. Die Rückkopplung des Magnetometerkanals schafft mit anderen Worten einen Raum, in dem das homogene Magnetfeld konstant gehalten wird, der magnetische Fluss also gleich Null ist. In diesem quasi feldfreien Raum befindet sich auch der Gradiometer-SQUID 6, der so den Magnetfeldgradienten messen kann, ohne durch große homogene Magnetfelder belastet zu sein. Die beiden SQUID-Sensoren 6, 10 liegen dabei derart nahe beieinander, dass sie das gleiche Feld der Rückkopplung des Magnetometers 3 sehen.

[0032] Das SQUID-Gradiometer 2 ist als direkt gekoppeltes Gradiometer ausgelegt, dessen Rückkopplung über eine Flusskoppelschleife (FLL) erfolgt. Dabei wird eine gradiometrisch geformte Rückkoppelschleife 12 (Leiterschleife) in Form einer unter dem SQUID 6 liegenden Acht verwendet (vgl. **Fig. 4**). Dadurch wird ein Gradientenfeld erzeugt, das den äußeren, zu messenden Magnetfeldgradienten kompensiert.

[0033] Das SQUID-Magnetometer 3 soll von diesem Rückkoppelfeld des Gradiometers 2 nichts spüren, um das homogene Magnetfeld ungestört messen zu können. Dies wird durch die spezielle Form der Auslegung des Magnetometers 3 erreicht. Die Magnetometerantenne 8 besteht nicht wie üblich aus einer einfachen Schleife, beispielsweise der linken Hälfte des Gradiometers 2. Eine exakte Anordnung der beiden Auslese-SQUIDs 6, 10 von Gradiometer 2 und Magnetometer 3 und ihrer Rückkoppelschleifen derart, dass die Felder der Rückkoppelschleife des

Gradiometers 2 nicht in das Magnetometer 3 eingreifen, wäre dann nämlich kaum realisierbar. Dies hätte zur Folge, dass dieses Feld im Magnetometerkanal fälschlicherweise mit zurückgekoppelt werden würde. Stattdessen besteht die Magnetometerantenne 8 aus zwei separaten Schleifen 13, 14 die symmetrisch zum Auslese-SQUID 6 angeordnet sind. Bei einem homogenen äußeren Feld erzeugen die Abschirmströme in den beiden Antennenschleifen 13, 14 magnetische Flüsse im Auslese-SQUID 6, die sich konstruktiv überlagern und daher messbar sind. Der Sensor ist somit empfindlich gegenüber homogenen Feldern. Die in der Rückkoppelspule 12 des Gradiometers 2 erzeugten Felder hingegen verursachen entgegengesetzt gerichtete Abschirmströme, so dass Flüsse entstehen, die sich gegenseitig kompensieren. Im Ergebnis wird somit kein Fluss im Auslese-SQUID 6 erzeugt. Der Magnetometer-SQUID 10 arbeitet also völlig unbeeinflusst von Magnetfeldgradienten. In den Fig. 2 und 3 sind die entsprechenden Ströme schematisch eingezeichnet. Dabei sind die von der Rückkopplung des Gradiometers 2 erzeugten Ströme 15 mit durchbrochenen Linien und die von homogenen Feldern hervorgerufenen Abschirmströme 16 mit strichpunktierten Linien dargestellt.

[0034] Die Rückkopplung des Magnetometer-SQUIDs 10 erfolgt über eine hinreichend große Spule, die das homogene Magnetfeld über der Gesamtanordnung aus Gradiometer 2 und Magnetometer 3 kompensiert. Das hat zwei Folgen für das Gradiometer 2: Zum einen kommt die parasitäre Empfindlichkeit des Auslese-SQUIDs 6 gegenüber homogenen Feldern nicht mehr zum Tragen, die Balance wird also deutlich erhöht. Zum anderen gibt es keine umlaufenden Abschirmströme im Äußeren der Antenne 4 mehr, so dass das Gradiometer 2 selbst von Bewegungen im Erdfeld unbeeinflusst bleibt.

[0035] Dieses Prinzip funktioniert um so besser, je homogener das Rückkoppelfeld des Magnetometers 3 ist und je geringer der Unterschied zwischen den durch diese Rückkoppelschleife 17 erzeugten Feldern am Ort des Magnetometers 3 und des Gradiometers 2 ist. Für letzteres ist es angebracht, Gradiometer 2 und Magnetometer 3 symmetrisch im Rückkoppelfeld anzuordnen. Für eine große Homogenität des Feldes ist die Spule entsprechend auszulegen. Dies kann durch einen großen Spulendurchmesser geschehen oder durch geschickte Auslegung der Spulengeometrie. Ein Ausführungsbeispiel der Messvorrichtung 1 unter Verwendung einer kleinen Helmholtzspule 17 für die homogene Rückkopplung zeigen die Fig. 4 und 5.

[0036] Fig. 4 zeigt die erfindungsgemäße Messanordnung, wie sie beispielsweise auf einem einzigen Chip realisiert werden kann. Dabei sind Gradiometer 2 und Magnetometer 3 in einer planaren Anordnung in enger Nachbarschaft auf einem gemeinsamen Substrat, beispielsweise einem Bikristall-Substrat mit den Abmessungen 10 cm × 10 cm, angeordnet. Erfahrungswerte zeigen, dass beispielsweise bei einer

einfache Spule mit einem Spulendurchmesser für die Rückkoppelspule 17 des Magnetometers 3 von einem Meter ein Abstand des Gradiometer-Sensors 6 zum Magnetometer-Sensor 10 von etwa zehn Zentimetern ausreichend ist. Ist die Rückkoppelspule kleiner, müssen auch die Sensoren näher zueinander angeordnet sein. Unter dem Substrat ist die Rückkoppelspule 12 des Gradiometers 2 angebracht. Die aus Gradiometer 2, Magnetometer 3 und Rückkoppelspule 12 bestehende Messanordnung wird vorzugsweise verkapselt. Die Kapsel (nicht abgebildet) ist dann in eine kleine Helmholtz-Spule 17 eingebaut, die sich an einem Messstab (nicht abgebildet) befindet. Die Helmholtz-Spule 17 ist derart ausgelegt, dass bei einem gegebenen geringen Platzangebot eine möglichst homogene Feldverteilung über dem Chip erzielt wird.

[0037] Aus Symmetriegründen besonders vorteilhaft ist, dass Gradiometer 2 und Magnetometer 3, wie in Fig. 5 gezeigt, nebeneinander auf einem gemeinsamen Substrat liegen.

[0038] In einer weiteren Ausführungsform (nicht abgebildet) sind Gradiometer 2 und Magnetometer 3 auf zwei Substraten getrennt übereinander angeordnet.

[0039] Alle in der Beschreibung, den nachfolgenden Ansprüchen und der Zeichnung dargestellten Merkmale können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination miteinander erfindungswesentlich sein.

#### Bezugszeichenliste

1	Messvorrichtung
2	Gradiometer
3	Magnetometer
4	Gradiometerantenne
5	Verbindungsleitung
6	Gradiometer-SQUID
7	Anschlüsse
8	Magnetometerantenne
9	Verbindungsleitung
10	Magnetometer-SQUID
11	Anschlüsse
12	Gradiometer-Rückkoppelspule
13	erste Magnetometer-Aufnehmerschleife
14	zweite Magnetometer-Aufnehmerschleife
15	Rückkopplungsstrom
16	Abschirmstrom
17	Magnetometer-Rückkoppelspule
18	Josephson-Kontakte

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung eines Magnetfeldgradienten, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Messung des Magnetfeldgradienten das homogene Hintergrundmagnetfeld durch ein Magnetometer (3) mit Rückkoppelschleife (17) konstant gehalten wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekenn-

zeichnet, dass das Hintergrundmagnetfeld über der Gesamtanordnung von Gradiometer (2) und Magnetometer (3) konstant gehalten wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Messung in Gradiometer (2) und/oder Magnetometer (3) mit SQUID-Sensoren (6, 10) erfolgt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Gradiometer (2) eine Rückkoppelschleife (12) verwendet, um den äußeren zu messenden Magnetfeldgradienten konstant zu halten.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückkopplung des Gradiometers (2) und die Rückkopplung des Magnetometers (3) mittels getrennter Rückkoppelschleifen (12, 17) erfolgen, so dass sich die Rückkopplungen gegenseitig nicht beeinflussen.

6. Vorrichtung (1) zur Messung eines Magnetfeldgradienten, mit einem Gradiometer (2) und mit einem Magnetometer (3) mit Rückkoppelschleife (17) zur Erzeugung eines konstanten homogene Hintergrundmagnetfeldes am Ort des Gradiometers (2).

7. Vorrichtung (1) nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Gradiometer (2) und das Magnetometer (3) derart benachbart zueinander angeordnet sind, dass sie dem gleichen Hintergrundmagnetfeld ausgesetzt sind.

8. Vorrichtung (1) nach Anspruch 6 oder 7, gekennzeichnet durch einen SQUID-Sensor als Magnetfeldgradientensensor (6) des Gradiometers (2) und/oder als Magnetfeldsensor (10) des Magnetometers (3).

9. Vorrichtung (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der SQUID-Sensor (6, 10) einlagig ausgeführt ist.

10. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Gradiometer (2) eine Rückkoppelschleife (12) aufweist.

11. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch getrennte Rückkoppelschleifen (12, 17) für Gradiometer (2) und Magnetometer (3).

12. Vorrichtung (1) nach Anspruch 10 oder 11, gekennzeichnet durch eine Gradientenspule in Form einer liegenden Acht als Rückkoppelspule der Rückkoppelschleife (12) des Gradiometers (2).

13. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch eine große äußere

Spule als Rückkoppelspule der Rückkoppelschleife (17) des Magnetometers (3).

14. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch eine Helmholtz-Spule als Rückkoppelspule der Rückkoppelschleife (17) des Magnetometers.

15. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, gekennzeichnet durch ein direkt gekoppeltes Gradiometer (2).

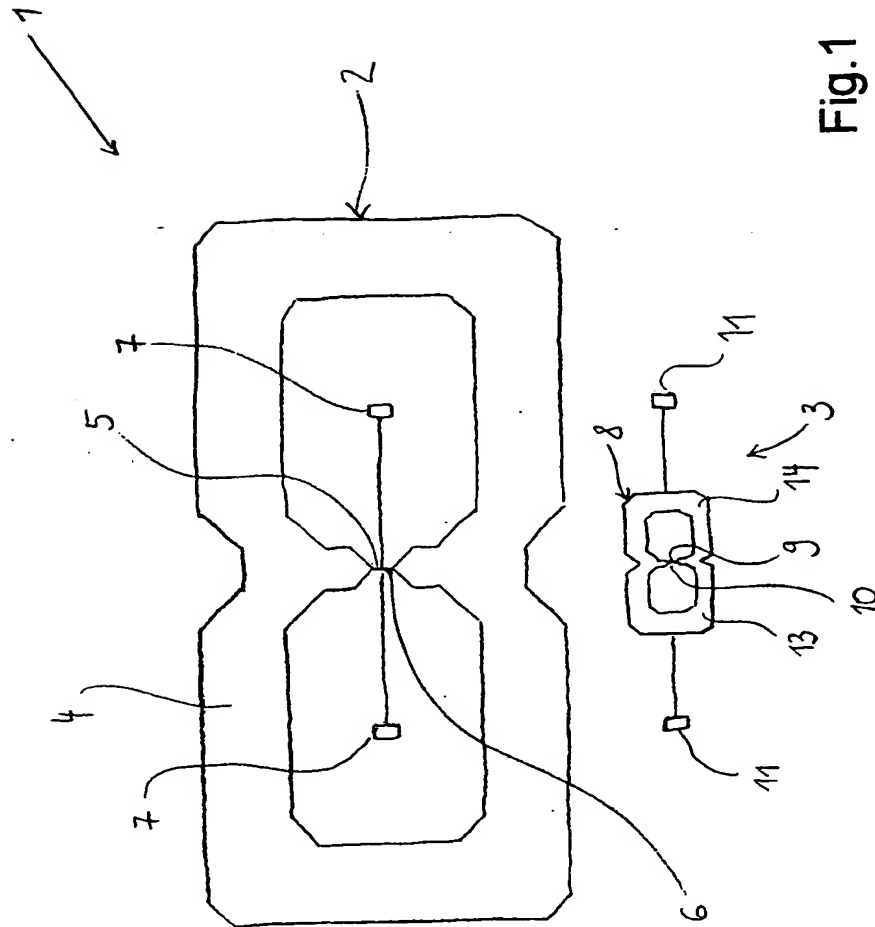
16. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 15, gekennzeichnet durch ein direkt gekoppeltes Magnetometer (3).

17. Vorrichtung (1) nach Anspruch 16, gekennzeichnet durch zwei symmetrisch zum Gradiometer (2) angeordnete Aufnehmerschleifen (13, 14) des Magnetometers (3).

18. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 17, gekennzeichnet durch eine planare Anordnung von Magnetfeldgradientensensor (6) und Magnetfeldsensor (10) auf einem gemeinsamen Substrat.

19. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass Magnetfeldgradientensensor (6) und Magnetfeldsensor (10) übereinander angeordnet sind.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen





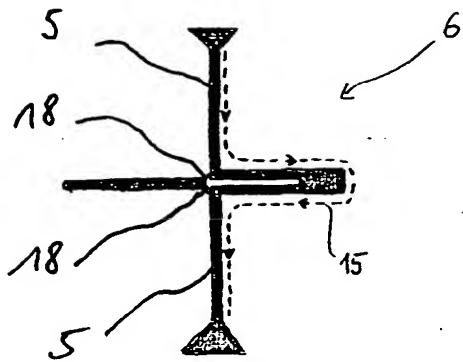


Fig. 2

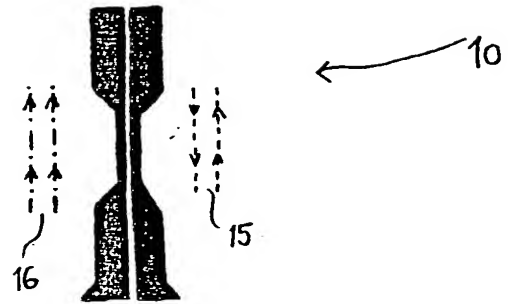


Fig. 3

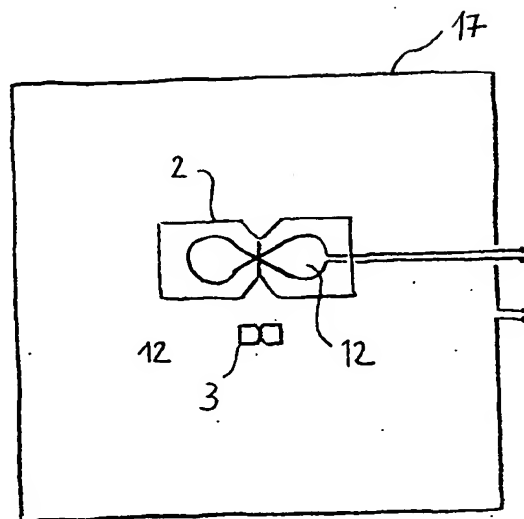


Fig. 4

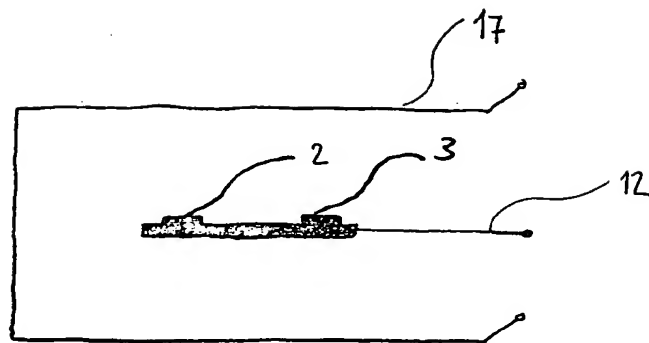


Fig.5